第41卷 第9期
2024年9月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 41 No. 9
Sep. 2024

1990—2022年天山北坡地区不同开垦年限耕层土壤盐分变化

张 彬[1,2,3]， 郑新军[1,2]， 王玉刚[1,2]， 唐立松[1,2]，
李 彦[1,2,3]， 杜 澜[1,2,3]， 田胜川[1,2,3]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所，荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；
2. 中国科学院阜康荒漠生态系统国家站，新疆 阜康 831505；3. 中国科学院大学，北京 100049）

摘 要：近年来，随着频繁的土地利用变化和大量耕地的开垦，土壤盐渍化已成为导致天山北坡耕地质量退化、阻碍绿洲农业发展的环境因素。本研究基于翔实的调查数据资料、土壤实测数据和中国土地覆盖数据集（CLCD），比较传统插值模型和随机森林插值模型对耕层土壤（0~30 cm）含盐量插值的优缺点；选取精度最高的定量预测模型对天山北坡地区耕层土壤含盐量定量预测，得到耕层土壤含盐量分布变化特征；以空间换时间，将近30 a新开垦耕地耕层土壤含盐量进行比较，分析开垦年限对土壤含盐量的影响。结果表明：（1）与传统的插值方法相比，随机森林算法能够更准确地预测盐渍化土地的土壤盐分分布情况。（2）天山北坡地区，耕层土壤含盐量存在较大空间异质性，即高海拔地区土体中的盐分会随着径流的淋溶，在低海拔的河流下游尾闾或低洼区靠近沙漠一侧积聚。（3）随着开垦年限的延长，天山北坡地区耕层土壤含盐量总体呈现下降的趋势，且土壤盐渍化程度倾向于聚集在一个中等的水平上，趋向于平衡或“中心化”。本研究增进了对当前耕地盐渍化状况及从原始荒地开垦到耕地后耕层土壤盐分变化历程的理解。这为干旱区备用土地资源的开发、管理和有效利用提供了理论支撑，并为农业的持续发展提供了科学依据。

关键词：随机森林；耕层土壤盐渍化；开垦年限；时空变化；天山北坡

土壤盐渍化会导致耕地质量退化，任其发展将威胁农业生产的可持续性和绿洲生态环境的稳定性[1-2]。新疆位于我国西北干旱区最西部，耕地面积虽只占国土面积的4%，但分布广阔且后备资源丰富，是我国重要的耕地资源后备基地。上世纪50年代起，大量荒地被开垦，目前新绿洲新增耕地面积已占新疆耕地总面积的35%左右[3]。然而，受区域干旱气候及水文地质条件的影响，新疆耕地土壤母质普遍含盐，自然肥力低，盐渍化耕地呈现面积大、类型多、积盐重、形成复杂等特点[4]，是我国西北地区受盐渍化威胁最严重的省区。在宜垦荒地中，盐渍化土地也占到75%以上，在新疆1.03×10^7 hm^2的宜农垦荒地中，受盐渍化制约难以开发利用的土壤面积占49.93%，达到5.15×10^6 hm^2[5]。加上多年来不合理的耕作灌溉方式影响，使得原本脆弱的绿洲农业耕地土壤质量进一步退化，极大制约了新疆农业用地的开发和利用[6]。

目前有关盐渍化土壤的相关研究多集中于改良方法[7]、水盐运移规律[8]、土壤盐渍化的预测预报[9]、土壤盐分空间变异性[10]、土壤盐渍化逆向演替过程[11]以及遥感等技术应用于土壤盐渍化的分级与监控等[12]方面，并提出了相应的调控技术和管理方案。例如，周丽等[13]以典型荒漠区原生荒地及开垦农田为研究对象，阐明了原生盐渍化荒地开垦后不同管理措施下土壤可溶盐总量的变化规律，开垦后土壤剖面中可溶盐总量的垂直分布和季节变化

收稿日期：2024-03-26； **修订日期：**2024-04-28
基金项目：第三次新疆综合科学考察项目课题（2022xjkk0901）；国家自然科学基金项目（42171068，42330503）；自治区“天山英才”培养计划（2023TSYCLJ0048）
作者简介：张彬（1998-），男，硕士研究生，主要从事农业和土壤生态学研究. E-mail: zhangbin211@mails.ucas.ac.cn
通讯作者：唐立松. E-mail: tangls@ms.xjb.ac.cn

规律。张寿雨等[14]结合统计学、地理信息系统和遥感技术,分析了克拉玛依农业开发区不同开垦年限土壤盐分的变化。此外,李宝富等[15]以新疆奇台县绿洲不同耕种时间土壤含盐量为研究对象运用聚类分析与相关分析法对其含盐量变化规律、盐分剖面类型及其影响因素进行了研究。然而,跟踪和监测开垦后连续耕作对耕层土壤含盐量的长期影响面临多重挑战,长期且系统的数据收集难度大,需要投入大量的人力和财力,而且以往研究通常聚焦于开垦前的土壤状况或短期耕作措施的影响,忽视了开垦年限对土壤盐分变化的长期作用。此外,尽管遥感技术、地理信息系统和数据分析技术的进步为这一领域的研究提供了新的工具,但技术和方法的局限性仍然制约了对土壤盐分长期变化和分布规律深入研究的进展。因此,开垦后连续耕作下土壤盐分变化和分布规律的研究还相对缺乏。

本研究以第三次新疆综合科学考察划定的五大片区之一天山北坡地区为研究区,对耕层(0~30 cm)土壤进行采样,测定耕层土壤电导率(Electrical Conductivity,EC),并通过已建立的研究区耕层土壤电导率与含盐量之间的数量关系对区域耕层土壤含盐量(Total Salt Content,TSC)进行估算,并进行空间插值和评价,揭示不同开垦年限耕地土壤盐渍化的空间分布特征,并探究连续耕作年限下耕层土壤盐分的动态变化,为制定合理的绿洲开发和耕层土壤盐渍化的防治、改良和有效利用提供数据支持。

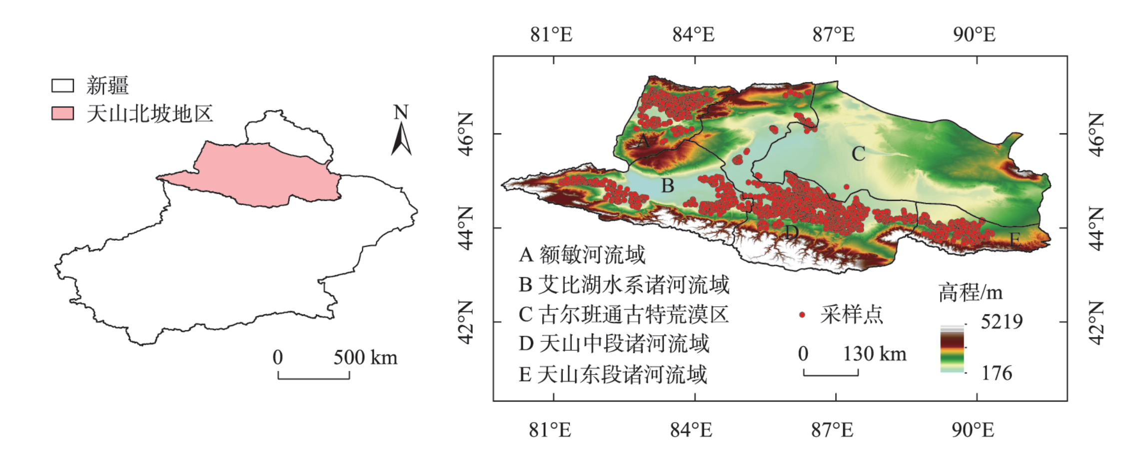
1 数据与方法

1.1 研究区概况

以第三次新疆综合科学考察所划定五大片区之一的天山北坡地区为研究区(图1),以三级流域区划水系为基础,可划定为额敏河流域、艾比湖水系诸河流域、天山中段诸河流域、天山东段诸河流域和古尔班通古特荒漠区,面积为25.51×10^4 km^2,占新疆总面积15.32%。属干旱的温带大陆性气候,季节差异明显,冬季以降雪为主,降水自西向东逐渐减少。行政上包括博尔塔拉蒙古自治州、昌吉回族自治州、塔城地区、奎屯市和克拉玛依市全部区域,乌鲁木齐市大部分地区,阿勒泰地区的福海县、富蕴县和青河县南部荒漠地区,伊宁县、尼勒克县和和静县北部向北流向准噶尔盆地的河源山区,及新疆生产建设兵团所辖的五师双河市、六师五家渠市、七师胡杨河市、八师石河子市、九师白杨市和十二师所辖各团场。耕地资源主要分布于300~1500 m的中、低海拔地势相对平缓的平原和丘陵地区,以流水地貌类型的山前平原地带为主。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 野外采样和室内分析 根据天山北坡地区近期遥感影像,先进行均匀网格布点,再根据交通可达性和作物种植情况对采样地块进行微调,用GPS对采样点进行定位。选定耕地地块后,在其内部采取"之"字形采样路线,选取4~5个采样点,采集0~30 cm耕层土壤进行混合获得土样,同时,以用环刀法测定土壤容重,同时为减小土壤样品的一些物理



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2020)4642,对底图边界无修改。下同。

图1 新疆天山北坡地区耕地及其采样点分布

Fig. 1 Distribution of farmland and its sampling points on the northern slope of the Tianshan Mountains in Xinjiang

或化学性质变化，采集后将土壤样品放在密封袋中，自然条件下进行风干处理，最终获得有地理坐标等有效信息样品1465份（图1），挑拣出细根、砾石等杂物，并进行称量，计算并记录其质量占比。并在同年8月完成土壤样品指标测定（按照1:5水土比制备土壤浸出液，用电导率仪测定EC值）。用已建立的研究区耕层土壤EC值与含盐量之间的数量关系换算耕地土壤可溶盐总量，换算公式如图2所示。

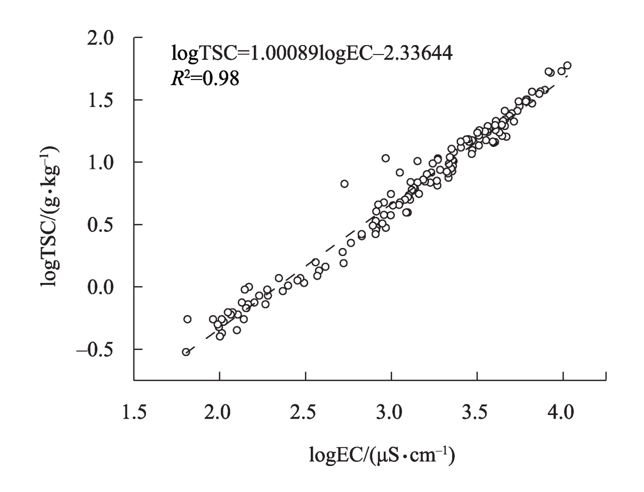


图2　新疆天山北坡地区耕层土壤电导率（EC）值与土壤含盐量（TSC）的对数线性拟合关系

Fig. 2　The log-linear fitting relationship between the topsoil electrical conductivity value (EC) and total salt content (TSC) on the northern slope of the Tianshan Mountains in Xinjiang

1.2.2　耕地土壤含盐量插值及其验证　本研究采用随机森林（Random Forest，RF）模型[16]对耕层土壤含盐量数据进行逐像元插值，并将机器学习算法的插值结果与传统的经验贝叶斯克里金（Experience Bayesian Kriging，EBK）、反距离权重（Inverse Distance Weighting，IDW）、范克里金（Universal Kriging，UK）、简单克里金（Simple Kriging，SK）和普通克里金（Ordinary Kriging，OK）等传统的插值方法[17]进行精度对比，同时本研究使用了泰勒图[18]来总结模型性能的多个方面。RF模型的构建和模拟过程通过Python 3.10中的scikit-learn包实现，相关的辅助数据信息见表1。

为了减少计算量并保证土地利用和土地覆盖精度，参照土地资源分类，将土地利用类型重新划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地（沙漠、裸地）六大类。并将天山北坡地区土地覆盖数据集（1990—2022年）及所有栅格数据空间分辨率统一重采样至90 m。

1.2.3　盐渍化程度划分及耕地开垦年限的确定　按照《新疆土壤》将耕地土壤含盐量≤3 g·kg^{-1}、3~6 g·kg^{-1}、6~9 g·kg^{-1}、9~12 g·kg^{-1}和≥12 g·kg^{-1}时，分别划定为非、轻度、中度、重度和极重度盐渍化等级[10]。将1990—2022年天山北坡地区土地覆盖数据影像进行叠加，判断每个像元由其他土地类型转化为耕地的时间，确定为开垦年以及开垦年限，以空间换时间，假设不同地点的空间差异可以反映在一个地点上随时间的变化。统计各开垦年天山北坡地区耕地土壤含盐量的平均值和变异系数（%），分析近32 a的时间序列变化。为了减少数据噪声对开垦年限变化趋势的影响，首先采取双指数模型对数据进行平滑，然后根据画出原始和平滑后数据随时间变化

表1　随机森林辅助数据来源与预处理

Tab. 1　Source and preprocessing of random forest auxiliary data

数据	格式与分辨率	来源与预处理
土地利用	栅格，30 m	中国年度土地覆盖数据集（annual China Land Cover Dataset，CLCD）[19]
人口、GDP	栅格，1 km	中国科学院资源环境科学与数据中心（http://www.resdc.cn/）中的中国人口空间分布公里格网数据集
区位	栅格，1 km	到主干道距离、到次干道距离、到河边距离、到市中心距离数据来源于Open Street Map（https://www.openstreetmap.org/）
地形	栅格，90 m	DEM数据采用ASTER GDEM产品，来自地理空间数据云(坡度、坡向、剖面曲率和平面曲率数据基于DEM数据在ArcGIS内计算得到
气象	栅格，1 km	年平均气温和降水数据来源于中国1 km分辨率逐月降水量数据集[20]。PET采用Hargreaves潜在蒸散发计算得到
NDVI、FVC	栅格，90 m	由谷歌地球引擎（Google Earth Engine，GEE）计算得到
土壤理化性质	实测值	pH值、EC值和容重数据为实测值
土壤质地	矢量数据	中国土壤质地空间分布数据（http://www.resdc.cn/）
土壤类型	矢量数据	国家青藏高原科学数据中心（http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/）

的点线图,判断可能存在的断点,分段采用Theil-Sen回归估计各阶段的变化斜率(s),采用Kendall秩相关系数(τ)及其P值检验变化斜率是否显著大于或小于零。如果$s<0$,采取左尾检验;当$s>0$时,采取右尾检验。当$P<0.05$,则统计显著,否则不显著。

2 结果与分析

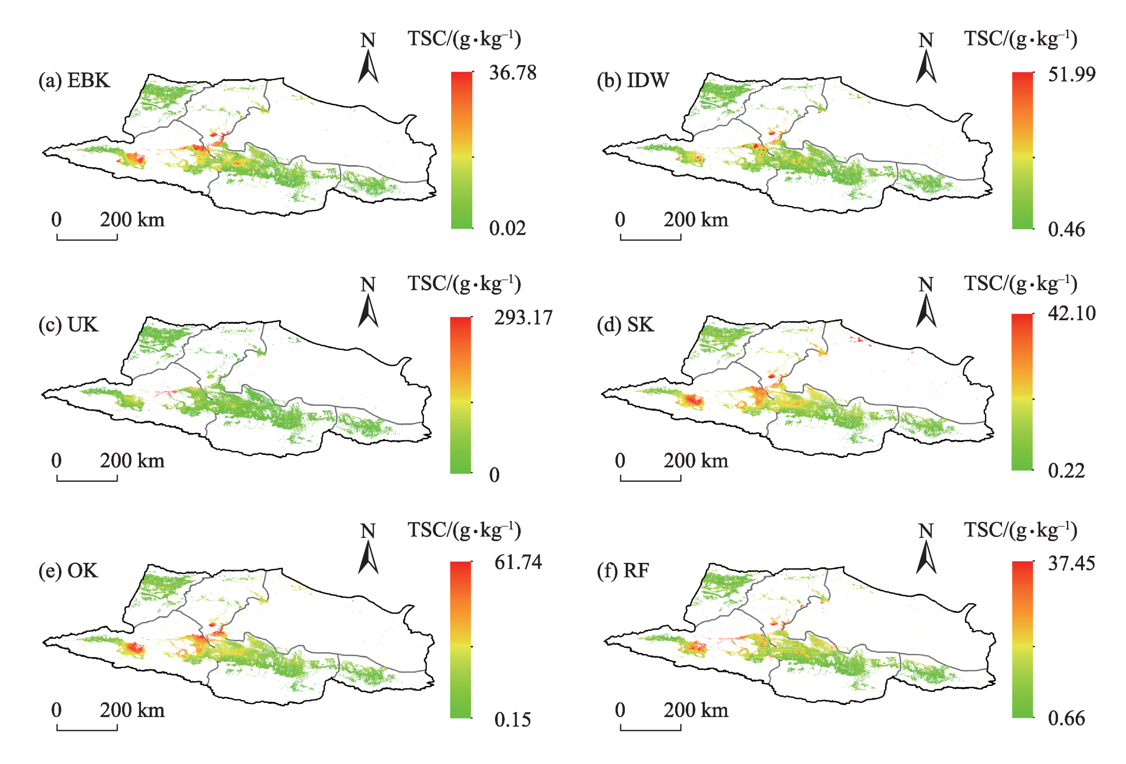
2.1 耕层土壤含盐量预测精度与评价

采取EBK、IDW、UK、SK、OK和RF模型预测天山北坡地区耕层土壤含盐量,空间分布格局如图3a~图3f。如泰勒图(图4)所示,RF模型的拟合点与观测值点(Reference Value, Ref)的偏差小于EBK、IDW、UK、SK和OK模型;且RF模型的决定系数(R-Square, R^2)为0.84,远大于其他5种方法,这表明应用RF模型预测天山北坡地区耕层土壤含盐量具有更高的精度。另外,对预测值与实测值进行截距为零的对数线性回归表明:EBK、IDW、UK、SK、OK和RF模型预测值是实测值的(92±3)%、(85±4)%、(82±3)%、(78±3)%、(79+3)%和(98±3)%,且只有RF模型预测值与实测值之间没有显著差异(F=0.616,P=0.434),其他方法均显著小于1(F>5.708,P<0.018)(图5)。因此,RF模型方法最优,其他插值方法预测值与实测值存在显著偏差。

2.2 耕地土壤含盐量及其盐渍化程度分级的空间分布格局

天山北坡地区耕地土壤含盐量总体呈现随着海拔降低在河流的下游尾间积聚效应,表现为艾比湖流域和玛纳斯河下游地区的精河县、克拉玛依市至和布克赛尔蒙古自治县耕层土壤含盐量大于12 g·kg^{-1}明显高于其他市县,为研究区耕层土壤含盐量最高值分布区域;而额敏河流域(下游在哈萨克斯坦),天山西段博尔塔拉河和精河上游,沙湾至木垒一线天山中段和东段诸河流域南部近山一侧的耕层土壤含盐量普遍小于3.56 g·kg^{-1},且明显低于北部近沙漠一侧(图3f,图6)。

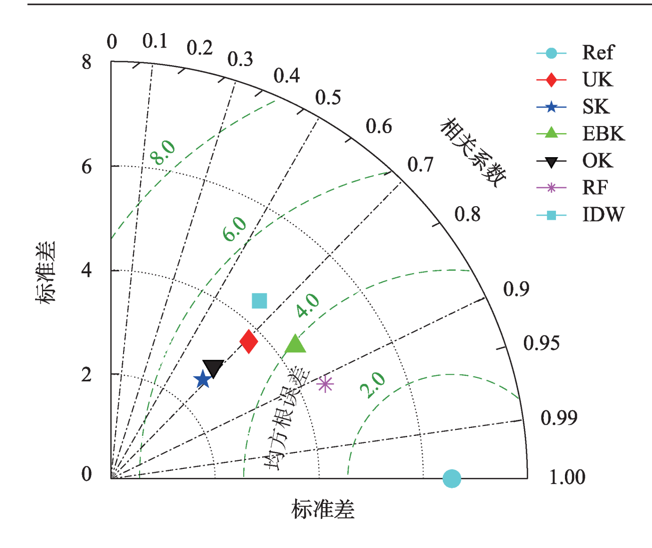
非、轻度、中度、重度和极重度盐渍化分别占天山北坡地区耕地的25.3%、31.8%、22.2%、11.7%和9.0%(图6,图7)。其中,在天山东段诸河和额敏河流域耕地盐渍化程度相对较低,非盐渍化和轻度盐渍化耕地面积分别为64.10%和24.31%,47.71%和44.89%;而天山中段诸河流域与天山北坡全域平均



注:EBK为经验贝叶斯克里格法,IDW为反距离加权法,UK为通用克里格法,SK为简单克里格法,OK为普通克里格法,RF为随机森林。下同。

图3 EBK、IDW、UK、SK、OK、RF模型预测新疆天山北坡地区耕层土壤含盐量空间分布

Fig. 3 EBK, IDW, UK, SK, OK, and RF models predicting the spatial distribution of topsoil salinity in the northern slope of the Tianshan Mountains in Xinjiang



注:各模型的结果通过与Ref点(观测值)在相关性、标准差及均方根误差上的偏差来评估模型性能。

图4 EBK、IDW、UK、SK、OK、和RF模型预测新疆天山北坡地区耕层土壤含盐量的泰勒图

Fig. 4 Taylor diagram of topsoil salinity predicted by EBK, IDW, UK, SK, OK, and RF models on the northern slope of the Tianshan Mountains in Xinjiang

水平基本持平,非、轻度、中度、重度和极重度盐渍化分别占中段诸河流域耕地的20.89%、37.16%、24.41%、11.77%和5.77%;艾比湖流域和古尔班通古特荒漠区盐渍化程度最高,前者极重度盐渍化耕地面积比重最大为23.33%,而后者没有非盐渍化耕地分布,且轻度盐渍化面积比重仅为6.04%(图6,图7)。

2.3 基于随机森林模型预测耕层土壤含盐量随开垦年限的变化

在1990—2022年0~30 cm耕地土壤含盐量平均值随着开垦年限经历了3个阶段,在前1~4 a、4~22 a和22~32 a,分别呈不显著下降(N=4, τ=−1, P=0.083)、不显著增加(N=19, τ=0.322, P=0.058)和显著下降(N=11, τ=−0.855, P=0.001)趋势,其变化斜率分别为−0.366 $g·kg^{-1}·a^{-1}$、0.012 $g·kg^{-1}·a^{-1}$和−0.102 $g·kg^{-1}·a^{-1}$(图8a)。

在1990—2022年0~30 cm耕地土壤含盐量的变异系数随着开垦年限也经历了3个阶段,在前1~4 a、4~12 a和12~32 a,分别呈不显著增加(N=4, τ=0.667, P=0.333)、显著减少(N=9, τ=−1, P<0.001)和显著增加(N=20, τ=0.714, P<0.001)趋势,变化斜率分别为1.368%$·a^{-1}$、−2.06%$·a^{-1}$和0.894%$·a^{-1}$(图8b)。

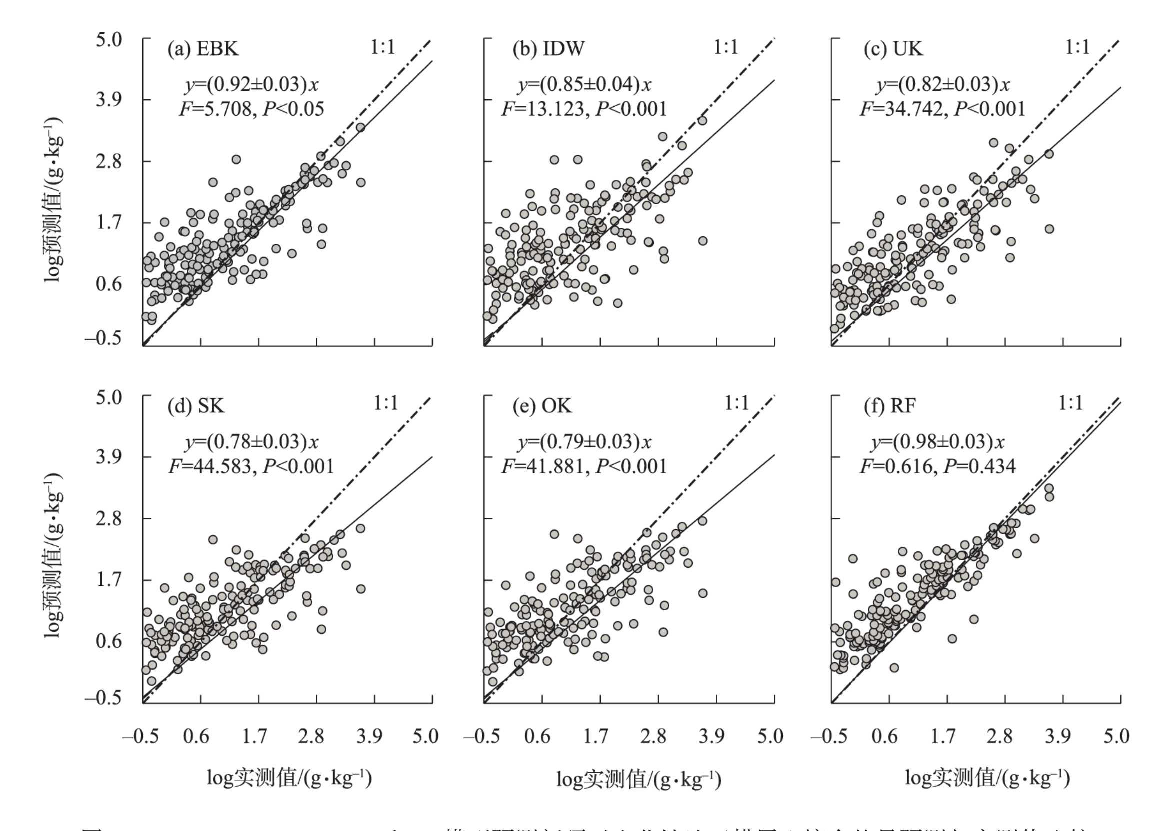


图5 EBK、IDW、UK、SK、OK和RF模型预测新疆天山北坡地区耕层土壤含盐量预测与实测值比较

Fig. 5 Comparison of predicted topsoil salinity and observed values using EBK, IDW, UK, SK, OK, and RF models for the northern slope of the Tianshan Mountains in Xinjiang

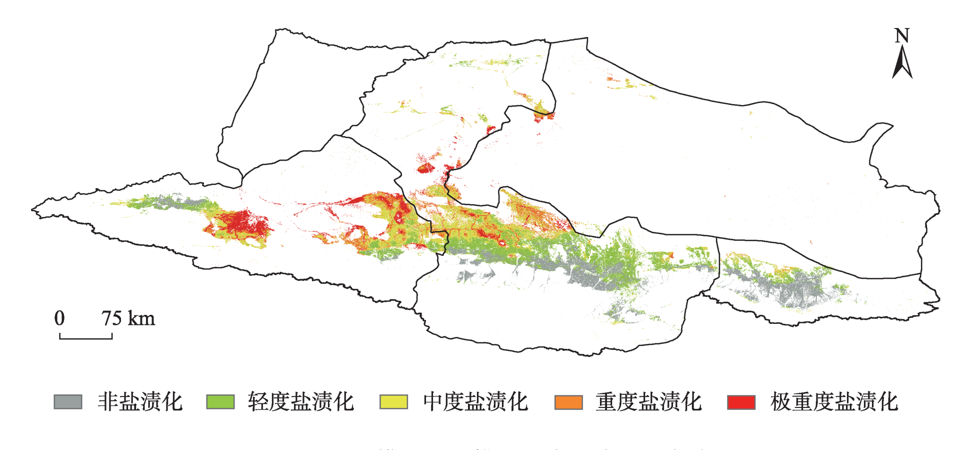


图6 基于RF模型预测耕层土壤盐渍化程度分级

Fig. 6 Prediction of topsoil salinization classification based on RF

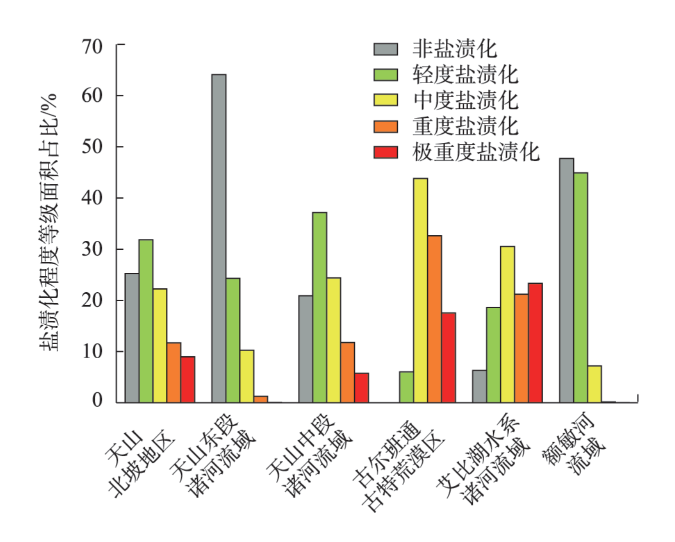


图7 基于RF模型预测耕层土壤盐渍化程度分级面积占比

Fig. 7 Prediction of area proportion of topsoil salinization classification based on RF

1990—2022年新疆天山北坡地区，非(N=32，τ=−0.214，P=0.089)和轻度(N=32，τ=−0.004，P=0.987)盐渍化耕地面积占比随着开垦年限呈不显著的下降趋势，变化斜率分别为−0.044%·a^{-1}和−0.001%·a^{-1}；而重度(N=32，τ=−0.444，P<0.001)和极重度(N=32，τ=−0.399，P<0.001)盐渍化耕地面积比重随着开垦年限呈显著下降趋势，其变化斜率分别为−0.153%·a^{-1}和−0.073%·a^{-1}；只有中度盐渍化耕地面积占比随着开垦年限呈显著增加趋势(N=32，τ=0.710，P<0.001)，变化斜率为0.283%·a^{-1}(图9)。

3 讨论

在我国西北干旱区，利用丰富的后备土地资源进行高效和可持续的农业开发是促进当地经济的重要举措。然而，随着膜下滴灌等节水措施的普及，农业开垦在对地表植被进行改造的同时，却使得灌区土壤排盐减弱[21]，土壤盐渍化逐渐成为限制区域灌溉农业持续发展的瓶颈[22]。

RF预测耕层土壤的盐分含量模型表现出了高度的预测准确性。这一发现与Fathizad等[23]的研究相似，他们利用有限的实地测量数据，基于RF预测了伊朗中部沙漠地区土壤盐分的时空分布，并报告了该方法获得的最佳预测结果。RF之所以能够在这些研究中表现出色，部分原因是因为能够有效捕捉影响耕层土壤含盐量空间分布的多种因素(如土壤类型、地形、气候、地下水位和农业活动等[24])之间的非线性关系和复杂交互。在数据收集过程中，数据质量问题(如缺失、错误或异常值)是不可避免的，RF对异常值和缺失数据具有较好的鲁棒性，使其能够在这些情况下仍保持较高的预测精度[25]。同时，RF以其独有的适用性和灵活性，不需要用户预设数据之间的空间关系，这使得RF模型更加灵活，可以适用于不同地区和不同条件下的土壤含盐量插值。因此与传统插值分析土壤含盐量分布的方法相比，RF能够对土壤含盐量空间分布提供更加可靠的预测效果，尤其是在实地测量数据有限的情况下，RF能够更准确地预测盐渍化土地的盐分分布情况[26]，即便本研究拥有充足的调查样本。

天山北坡地区属于典型的干旱和半干旱气候，年降水量极低而蒸发量却很高，导致土壤中的水分不足以将盐分淋洗出土壤层。这种不平衡造成了盐分在土壤表层的积累。研究区耕地几乎被不同程度的盐渍化土壤所覆盖，且盐渍化土地分布较为集中。其中艾比湖流域和玛纳斯河下游地区的精

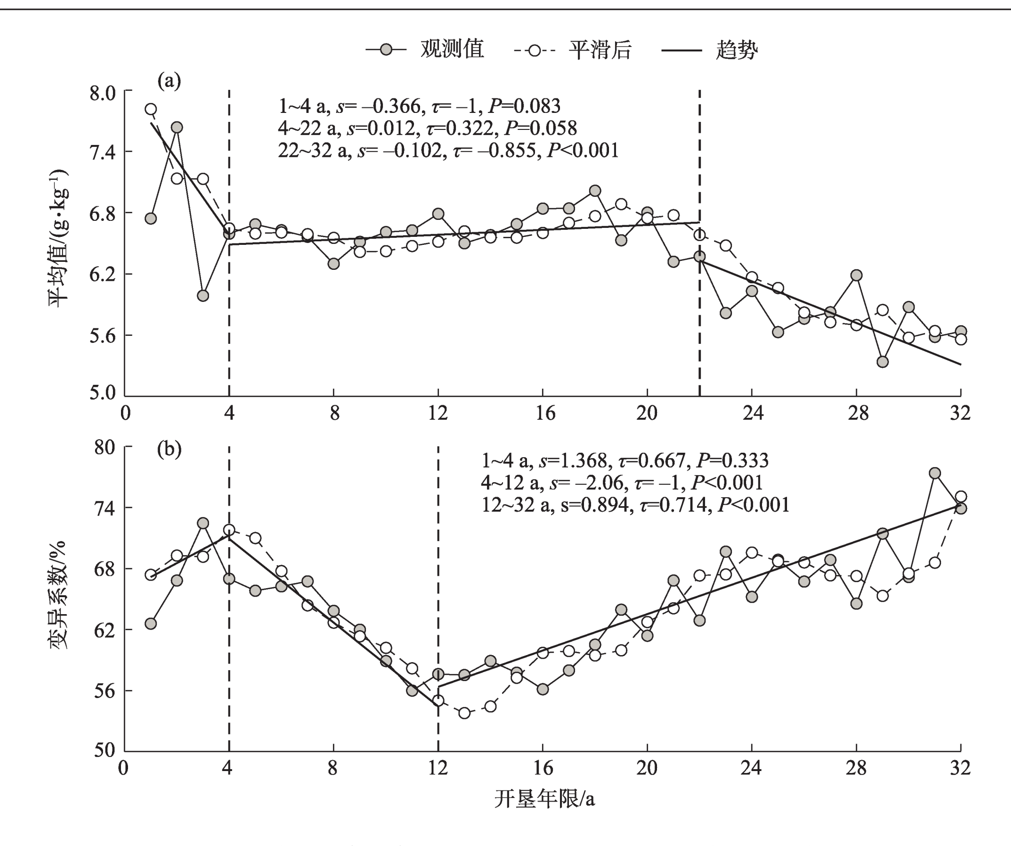


图8 1990—2022年新垦耕地耕层土壤平均含盐量和变异系数随开垦年限的变化

Fig. 8 The average salt content and coefficient of variation of the topsoil in newly reclaimed farmland changed with the duration of reclamation during 1990−2022

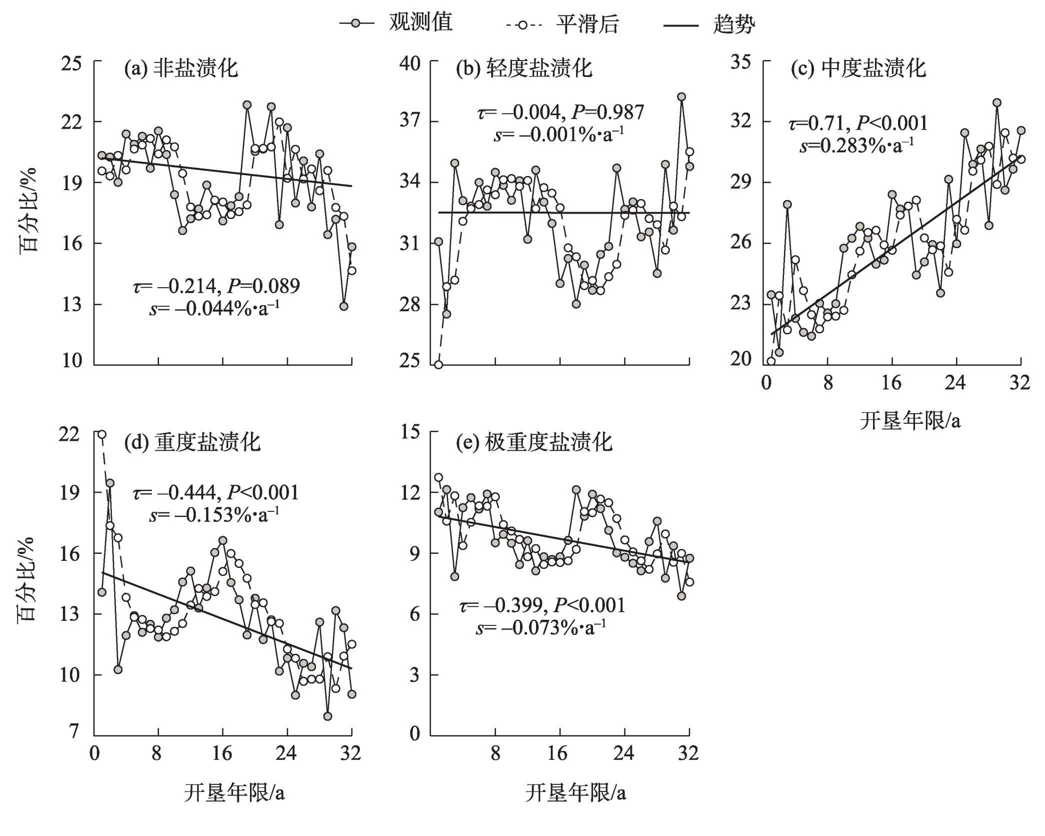


图9 1990—2022年新垦耕地耕层土壤盐渍化面积占比随开垦时间变化

Fig. 9 The proportion of salinized surface area of newly cultivated land changed with reclamation time during 1990−2022

河县、克拉玛依市至和布克赛尔蒙古自治县耕层土壤含盐量最高值分布区域,面临严重的耕层土壤盐渍化问题。这些区域多为海拔较低的低洼地区,且普遍分布着灰漠土和风沙土,这类土壤因其较差的保水性和排水条件,容易导致灌溉或降雨后水分在土壤表层蒸发,留下盐分。同时这些区域由于其靠近河流和高地下水位,使得这些土壤容易受到含盐分的地下水上升影响而发生盐渍化[27]。低洼地区可能作为高地径流的汇集区,增强了盐分的累积效果;在本研究区海拔较低地区往往是农业活动的集中地,包括广泛的灌溉实践。不合理的垦殖、灌溉管理,尤其是在排水条件不佳的地区,导致土壤盐分在灌溉区域内积累,从而增加区域内的土壤含盐量[28]。相反,额敏河流域、天山西段博尔塔拉河和精河上游,沙湾至木垒一线天山中段和东段诸河流域南部近山一侧的耕层土壤含盐量较低,这些区域海拔较高,且普遍分布着黑钙土和栗钙土。海拔的增加通常导致温度下降和降水量上升。较低的温度能够显著减缓土壤水分的蒸发速率,而增加的降水量促进了盐分的淋溶作用,有助于将表层土壤中的盐分迁移至更深层土壤或邻近水体中[29]。黑钙土和栗钙土由于其良好的结构和较高的有机质含量,通常具有较好的水分渗透性和较低的盐分积累能力,在一定程度上减轻了盐渍化程度。

新疆作为我国重要的耕地资源后备基地,随着节水滴灌措施的大面积推广和水资源合理开发利用,促使大面积荒地转变为耕地[30],但研究区内土壤本底条件存在差异,总体上优先开垦本底条件较好的土地,之后才开垦本底条件较差的土地。对于近年新开垦1~4 a的耕地,耕层土壤中盐分含量显著偏高,不利于作物生长,但土壤盐分具有“盐随水走”的特点[31-32],对新垦耕地土壤通过开沟排水、淡水或微咸水等灌溉淋洗而耕种[2,33],因此刚开垦阶段耕地随着洗盐的进行,盐分呈下降趋势,这也是重度、极重度盐渍化面积均呈下降趋势的原因。但土地开垦活动扰动土壤结构和盐分分布,暴露了原本不同土层的盐分,增加了表层土壤含盐量的不均匀性,使得变异系数在开垦1~4 a呈上升趋势。在随后开垦的4~22 a,平均含盐量呈上升趋势,这是由于新开垦耕地均采用膜下滴灌,原来的“浇地”变成“浇作物”,水分主要集中在灌溉区域的表层土壤,仅湿润一定深度土壤,很容易引起下层土壤盐分的向上运移[34],加之灌溉水源多为深层地下微咸水,且缺乏有效的淋洗措施,意味着累积的盐分难以被移除,从而长期滴灌会导致土壤盐分在作物根区周围和湿润锋边缘处聚集,进而导致土壤次生盐渍化,对农业种植环境和生态系统产生显著影响。同时,这也是研究区内非盐渍化、轻度盐渍化面积下降的主要原因。但4~12 a内,变异系数为下降趋势,随着耕作的持续和土地管理措施的实施(如灌溉淋洗等),可能有助于土壤盐分的移除或更均匀的分布,从而减少了含盐量的变异性。开垦时间超过22 a后,耕层土壤平均含盐量随着耕种年限的增加呈降低的变化趋势,而变异系数则为上升趋势,同时在开垦32 a内,总体上变化特征也表现为随着开垦年限的增长,耕层土壤平均含盐量呈现降低的趋势,这与周丽等[13]的研究相一致。这主要是因为农业种植过程中不断进行灌溉,将表层的盐分有效的淋溶至土壤深层和地下水中,使得生长季中,耕层土壤盐分水平能够在作物忍受的范围之内[35],长期的农业开垦活动,尤其是单一作物的大面积种植,可能导致部分地区土壤养分失衡和盐分累积。缺乏合理的轮作和休耕措施,使部分地区土壤无法得到有效的修复和恢复。使用不当的灌溉方式和管理方法,如过量灌溉、频繁灌溉以及未经良好排水处理等,可能导致某些地区土壤中盐分的上升浓缩,从而加剧盐渍化,变异系数不断增加。因此在开垦过程中非、轻度、重度、极重度盐渍化面积占比呈下降趋势,而中度盐渍化面积占比呈上升趋势。此外,在干旱条件下,高蒸发率倾向于集中盐分,可能导致随时间变化盐分再分布,使得更极端的盐渍化条件变得适中[36]。

4 结 论

基于RF模型对天山北坡地区耕层土壤含盐量进行插值,揭示研究区耕层土壤盐渍化特征,并从长时间尺度探究了不同耕作年限下耕层土壤盐分和分布规律的动态变化,得出以下结论:

(1) 与传统的插值方法相比,随机森林算法能够更准确地预测盐渍化土地的土壤盐分分布情况。

(2) 天山北坡地区,耕层土壤含盐量有较大的空间异质性,高海拔地区土体中的盐分随着径流的淋溶迁移,在低海拔的河流下游尾闾或低洼区靠近沙漠一侧积聚。

(3) 随着开垦年限的增加,天山北坡地区耕层土壤含盐量变化存在阶段性,总体呈现显著下降趋势,并呈现出中心化趋势,体现在重度和极重度盐渍化耕地面积占比显著降低,然而中度盐渍化耕地面积占比呈显著增加趋势。

这些发现不仅能为后备土地资源开发、保护、管理、有效利用和生态建设提供理论依据,也为实现农业持续发展提供一定的科学参考。

参考文献(References):

[1] 李彦, 郑新军, 王玉刚, 等. 绿洲-荒漠共生关系实验模拟平台(绿洲-荒漠平台)[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(12): 1506-1514, 1533. [Li Yan, Zheng Xinjun, Wang Yugang, et al. Experiment and simulation platform for oasis-desert symbiotic relationship (ODP)[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(12): 1506-1514, 1533.]

[2] 田长彦, 周宏飞, 刘国庆. 21世纪新疆土壤盐渍化调控与农业持续发展研究建议[J]. 干旱区地理, 2000, 23(2): 177-181. [Tian Changyan, Zhou Hongfei, Liu Guoqing. The proposal on control of soil salinization and sustainable agricultural development in the 21st century in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2000, 23(2): 177-181.]

[3] Gong L, Ran Q, He G, et al. A soil quality assessment under different land use types in Keriya River Basin, Southern Xinjiang, China [J]. Soil and Tillage Research, 2015, 146: 223-229.

[4] 庄庆威, 吴世新, 杨怡, 等. 近10年新疆不同程度盐渍化耕地的时空变化特征[J]. 中国科学院大学学报, 2021, 38(3): 341-349. [Zhuang Qingwei, Wu Shixin, Yang Yi, et al. Spatiotemporal characteristics of different degrees of salinized cultivated land in Xinjiang in recent ten years[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2021, 38(3): 341-349.]

[5] 乔木, 周生斌, 卢磊, 等. 近25 a来塔里木盆地灌区土壤盐渍化时空变化特点与改良治理对策[J]. 干旱区地理, 2011, 34(4): 604-613. [Qiao Mu, Zhou Shengbin, Lu Lei, et al. Temporal and spatial changes of soil salinization and improved countermeasures of Tarim Basin Irrigation District in recent 25 a[J]. Arid Land Geography, 2011, 34(4): 604-613.]

[6] 杨发相. 新疆玛纳斯河流域的土地利用与退化问题[J]. 新疆环境保护, 2002, 24(1): 8-12. [Yang Faxiang. Some problems on the land use and degradation in manas river watershed, Xinjiang[J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2002, 24(1): 8-12.]

[7] Mishra A, Sharma S D, Khan G H. Rehabilitation of degraded sodic lands during a decade of Dalbergia sissoo plantation in Sultanpur district of Uttar Pradesh, India[J]. Land Degradation & Development, 2002, 13(5): 375-386.

[8] Lee G, Carrow R N, Duncan R R. Growth and water relation responses to salinity stress in halophytic seashore paspalum ecotypes [J]. Scientia Horticulturae, 2005, 104(2): 221-236.

[9] 尤文瑞. 土壤盐渍化预测预报的研究[J]. 土壤学进展, 1988, 1(1): 1-8. [You Wenrui. Research on prediction and prediction of soil salinization[J]. Progress in Soil Science, 1988, 1(1): 1-8.]

[10] 王玉刚, 李彦, 肖笃宁. 灌区间盐分变迁与耕地安全特征——以三工河流域农业绿洲为例[J]. 干旱区地理, 2010, 33(6): 896-903. [Wang Yugang, Li Yan, Xiao Duning. The transformation of soil salinity in irrigational regions and cropland security: A case study in agricultural oasis of the Sangong River Catchment[J]. Arid Land Geography, 2010, 33(6): 896-903.]

[11] 韩茜, 熊黑钢. 奇台县绿洲农田土壤盐渍化逆向演替过程[J]. 水土保持学报, 2008, 23(2): 93-97. [Han Qian, Xiong Heigang. Study on influence factors and characters of reversal evolvement of farm land soil salinization in Qitai Oasis[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 23(2): 93-97.]

[12] Ivushkin K, Bartholomeus H, Bregt A K, et al. Soil salinity assessment through satellite thermography for different irrigated and rainfed crops[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 68(4): 230-237.

[13] 周丽, 王玉刚, 李彦, 等. 盐碱荒地开垦年限对表层土壤盐分的影响[J]. 干旱区地理, 2013, 36(2): 285-291. [Zhou Li, Wang Yugang, Li Yan, et al. Effects of cultivation on soil salinity in upper soil profiles of the saline-alkali land[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(2): 285-291.]

[14] 张寿雨, 吴世新, 贺可, 等. 克拉玛依农业开发区不同开垦年限土壤盐分变化[J]. 土壤, 2018, 50(3): 574-582. [Zhang Shouyu, Wu Shixin, He Ke, et al. Variation of soil salinity in Karamay agricultural development area in different reclamation years[J]. Soils, 2018, 50(3): 574-582.]

[15] 李宝富, 熊黑钢, 张建兵, 等. 不同耕种时间下土壤剖面盐分动态变化规律及其影响因素研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 429-438. [Li Baofu, Xiong Heigang, Zhang Jianbing, et al. Dynamic of soil salt in soil profiles different in cultivation age and its affecting factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(3): 429-438.]

[16] Illman S O. Hilber's fifth problem: Review[J]. Journal of Mathematical Sciences, 2001, 23(2): 1843-1847.

[17] Li J, Heap A D. Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review[J]. Environmental Modelling & Software, 2014, 53(1): 173-189.

[18] Taylor K E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D7): 7183-7192.

[19] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.

[20] Peng S Z, Ding Y X, Wen Z M, et al. Spatiotemporal change and trend analysis of potential evapotranspiration over the Loess Plateau of China during 2011-2100[J]. Agricultural and Forest Meteo-

rology, 2014, 233(53): 183-194.

[21] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版杜, 1993. [Wang Zunqin, Zhu Shouquan, Yu Renpei. Salinized Soil of China[M]. Beijing: Science Press, 1993.]

[22] 潘晓玲. 干旱区绿洲生态系统动态稳定性的初步研究[J]. 第四纪研究, 2001, 21(4): 345-351. [Pan Xiaoling. A preliminary study on the stability of oasis ecosystem in arid area[J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(4): 345-351.]

[23] Fathizad H, Ardakani M A H, Sodaiezadeh H, et al. Investigation of the spatial and temporal variation of soil salinity using random forests in the central desert of Iran[J]. Geoderma, 2020, 365(1): 233-245.

[24] Perri S, Molini A, Hedin L O, et al. Contrasting effects of aridity and seasonality on global salinization[J]. Nature Geoscience, 2022, 15(5): 375-381.

[25] Breiman L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32.

[26] 王明宽, 莫宏伟, 陈红艳. 基于多光谱影像反演土壤盐分的建模方法研究[J]. 土壤通报, 2016, 47(5): 1036-1041. [Wang Mingkuan, Mo Hongwei, Chen Hongyan. Modeling method of soil salinity inversion based on multispectral image[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(5): 1036-1041.]

[27] Salama R B, Otto C J, Fitzpatrick R W. Contributions of groundwater conditions to soil and water salinization[J]. Hydrogeology Journal, 1999, 7: 46-64.

[28] 王全九, 王文焰, 汪志荣, 等. 排水地段土壤盐分变化特征分析[J]. 土壤学报, 2001, 53(2): 271-276. [Wang Quanjiu, Wang Wenyan, Wang Zhirong, et al. Analysis of features of soil salt in a drainage area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2001, 53(2): 271-276.]

[29] Qadir M, Quillérou E, Nangia V, et al. Economics of salt-induced land degradation and restoration[J]. Natural Resources Forum, 2014, 38(4): 282-295.

[30] 陈乐, 程勇翔, 王江丽. 1990—2020年天山北坡经济带耕地时空动态变化的分析[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2022, 40(2): 223-230. [Chen Le, Cheng Yongxiang, Wang Jiangli. Analysis of temporal and spatial dynamic changes of farmland in north slope economic zone of Tianshan Mountain from 1990 to 2020[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2022, 40(2): 223-230.]

[31] Peck A J, Hatton T. Salinity and the discharge of salts from catchments in Australia[J]. Journal of Hydrology, 2003, 272(1-4): 191-202.

[32] 李毅, 王全九, 邵明安, 等. 非充分供水条件下滴灌入渗的水盐运移特征研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(1): 1-4. [Li Yi, Wang Quanjiu, Shao Ming'an, et al. Experimental study on water and salt transport characteristics under infiltration of non-sufficient trickle irrigation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(1): 1-4.]

[33] Bresler E. Simultaneous transport of solutes and water under transient unsaturated flow conditions[J]. Water Resources Research, 1973, 9(4): 975-986.

[34] Barrett-Lennard E G. Restoration of saline land through revegetation[J]. Agricultural Water Management, 2002, 53(1-3): 213-226.

[35] Lombardini L, Rossi L. Ecophysiology of plants in dry environments[J]. Dryland Ecohydrology, 2019, 23: 71-100.

[36] Stavi I, Thevs N, Priori S. Soil salinity and sodicity in drylands: A review of causes, effects, monitoring, and restoration measures[J]. Frontiers in Environmental Science, 2021, 9: 712831.

Changes in the salt content of the plow layer soil during cultivation from 1990 to 2022 on the northern slope of the Tianshan Mountains

ZHANG Bin[1,2,3], ZHENG Xinjun[1,2], WANG Yugang[1,2], TANG Lisong[1,2], LI Yan[1,2,3], DU Lan[1,2,3], TIAN Shengchuan[1,2,3]

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. Fukang Station of Desert Ecology, Chinese Academy of Sciences, Fukang 831505, Xinjiang, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In recent years, with frequent changes in land use and extensive reclamation of farmlands, soil salinization has become an environmental factor leading to the degradation of cultivated land quality and hindering the development of oasis-based agriculture on the northern slopes of the Tianshan Mountains. However, an objective understanding of the current status of soil salinization in cultivated lands and its evolution is lacking. This study, based on detailed survey data, actual soil measurements, and the China Land Cover Dataset, compares the advantages and disadvantages of traditional interpolation models and random forest interpolation models for estimating the salt content in the topsoil layer (0−30 cm). The most accurate quantitative prediction model was selected to quantitatively predict as well as obtain the distribution and change characteristics of the salt content in the plow layer soil of the northern slope of the Tianshan Mountains. By using space for time, the salt content in the plow layer soil of newly reclaimed farmland over 30 years was compared to understand the impact of cultivation duration. The results showed that: (1) Compared to traditional interpolation methods, the random forest algorithm could more accurately predict the soil salt distribution of salinized land. (2) In the northern Tianshan region, there was significant spatial heterogeneity in the salt content of the topsoil, with salt concentrations in the higher altitude areas leaching with runoff and accumulating in the lower altitude areas near rivers or in depressions close to the deserts. (3) With the extension of cultivation years, the overall salt content in the plow layer soil of the northern slope of the Tianshan Mountains decreased, and the degree of soil salinization converged at a moderate level, trending toward equilibrium or "centralization." This study has enhanced the understanding of the current salinization status of cultivated land and the alterations in soil salinity from the reclamation of virgin wastelands to cultivated lands. It provides theoretical support for the development, management, and effective use of reserve land resources in arid areas, and offers a scientific basis for the sustainable development of agriculture.

Keywords: Random Forest; salinization of plow layer soil; years of cultivation; spatio-temporal variation; northern slope of the Tianshan Mountains